



3.2 并网光伏逆变器

3.2.3 微型逆变器

3.2.3.1 微型逆变器概述

1. 微型逆变器技术背景

- 微型逆变器 (**Micro-Inverter MI**)，通常是对用于**独立光伏电池**并网发电系统DC-AC功率变换单元的统称，也称之为**AC module**。
- 单一光伏电池的功率仅在**几百瓦**，且组件与电网需要隔离，因此，这种微型逆变器实际上是一种特殊设计的**隔离型微小功率并网逆变器**。
- 国外学者于上世纪70年代提出了基于独立光伏电池的并网发电系统，即ACmodule。然而由于当时技术的限制，这种思想没有在实际中应用。到80年代末，美国 ISET (International Solar ElectricTechnology) 公司才真正对此作了深入研究，其中 Kleinkauf教授在多篇论文中研究了基于AC module的光伏并网发电思想，并强调其优点，当时称其为**模块集成变换器** (Module Integrated Converters)。



3.2 并网光伏逆变器

3.2.3 微型逆变器

3.2.3.1 微型逆变器概述

2. 微型逆变器主要**优、缺点**

主要**优点**有：

- **每一个光伏电池有独立的MPPT**，不存在光伏电池之间的不匹配损耗，且无热斑问题，可以实现发电量最大化；
- 采用模块化技术，即插即用式安装，快捷、简易、安全，另外安装时组件不必完全一致，还可随时对系统做灵活变更和扩容。
- 具有组件切断能力，使光伏系统摆脱了危险的高压直流电路，尤其是有利于防火。
- 传统集中式逆变器是光伏系统的故障高发单元，而且其分布式架构可以保证不会因单点故障而导致整个系统的失灵。
- 使用标准的MI安装材料，减少了安装材料和系统设计的成本，并且传输线成本也相应减少。
- 无须阻塞二极管和旁路二极管，传导损耗降低，系统布局紧凑，浪涌电压小。



3.2 并网光伏逆变器

3.2.3 微型逆变器

3.2.3.1 微型逆变器概述

2. 微型逆变器主要**优、缺点**

主要**缺点**有：

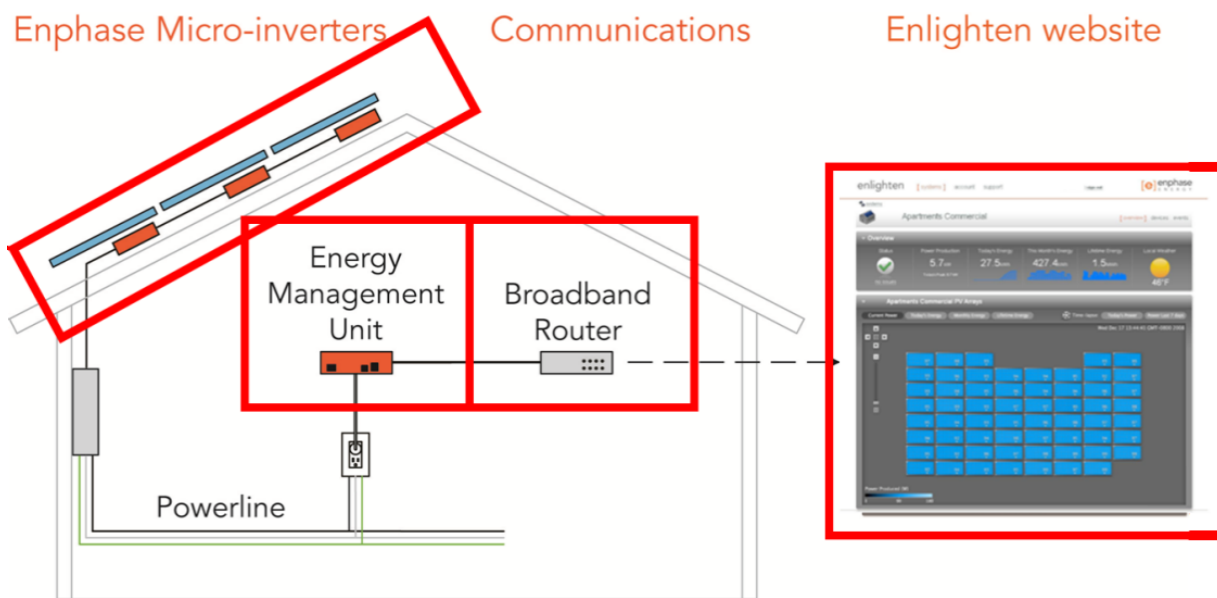
- 系统应用可靠性和寿命还难以与太阳能电池组件相匹配，一旦微型逆变器故障或损坏，更换比较麻烦。
- 与集中式逆变器相比，微型逆变器**效率相对较低**。但随着电力电子功率器件、磁性器件技术的发展，微型逆变器的效率将进一步提高。
- 相对**成本比较高**。
- 集中控制困难，需要采用电力载波通讯技术。

3.2 并网光伏逆变器

3.2.3 微型逆变器

3.2.3.1 微型逆变器概述

3. 微型逆变器系统的组成



- **微型逆变器**实现组件级并网发电功能;
- **能量管理单元 (EMU)** 实际上是一个通信网关, 其通讯采用先进的电力载波通讯;
- **Enlighten网站系统**提供了大量关于太阳能系统和独立太阳能模块性能的信息, 如采用图形化的太阳能阵列提供了每个模块的基本信息。

图3-41 Enphase Microinverters系统的主要组成部分



3.2 并网光伏逆变器

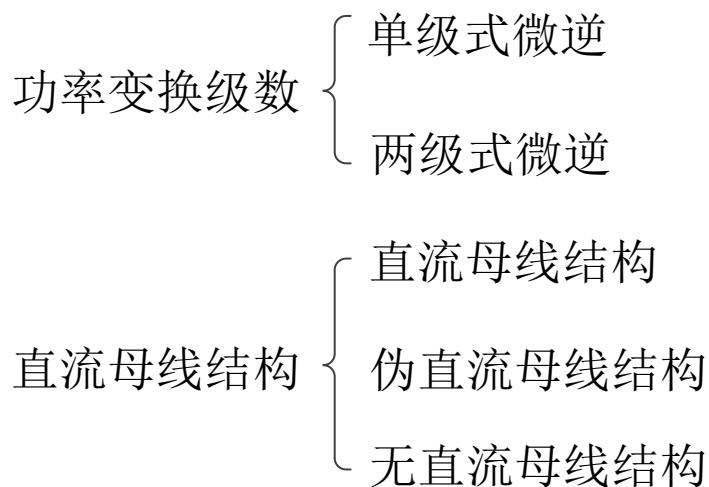
3.2.3 微型逆变器

3.2.3.2 微型逆变器的基本拓扑结构

1. 微型逆变器拓扑结构概述

- 微型逆变器先将输入的低直流电压**升压**后再转化为**交流电**并入电网，其拓扑结构要求由**DC/DC变换电路**和**DC/AC变换电路**组合而成。
- 每一类变换器的**主电路拓扑结构**又存在多种形式，比如**DC/DC变换电路**：BUCK、BOOST、BUCK-BOOST、CUK、SEPIC、ZETE变换电路、正激、反激、推挽、半桥、全桥变换电路；**DC/AC逆变电路**：推挽逆变、半桥逆变和全桥逆变电路。
- 目前微型逆变器**常见的分类方式**

微型光
伏并网
逆变器





3.2 并网光伏逆变器

3.2.3.2 微型逆变器的基本拓扑结构

2. 按**功率变换级数**分类的微型逆变器 (MI) 拓扑

单级式MI和两级式MI

(1) 单级式MI

单级式MI的典型拓扑结构如图3-43所示，该结构采用**DC/DC变换器**和**工频变换器****串联**的MI结构。

特点：所用器件少，成本低，可靠性高，适合应用于小功率场合。

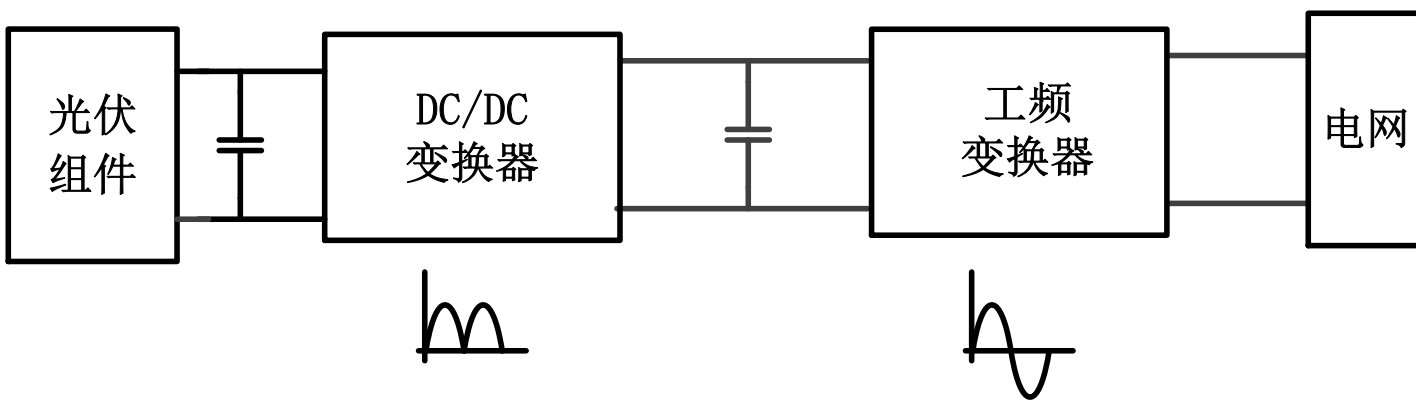


图3-43 单级式结构的MI



3.2 并网光伏逆变器

3.2.3.2 微型逆变器的基本拓扑结构

2. 按功率变换级数分类的微型逆变器 (MI) 拓扑

(1) 单级式MI

以Enphase等公司产品为代表的单级式MI原理结构如图3-44所示，该电路采用：**反激变换器**在实现MPPT控制的同时，使高频变压器副边**输出双正弦半波的直流电**，再经过**晶闸管工频变换器****逆变**后实行并网。

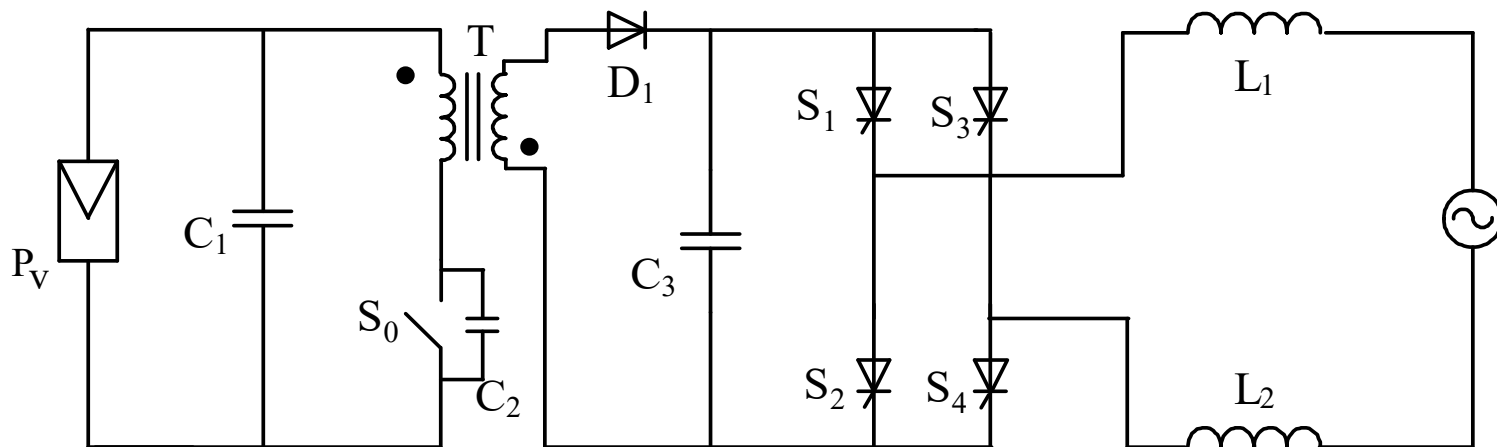


图3-44 采用**准谐振反激变换器**的单级式MI电路



3.2 并网光伏逆变器

3.2.3.2 微型逆变器的基本拓扑结构

2. 按**功率变换级数**分类的微型逆变器 (MI) 拓扑

(2) **两级式**MI

- 两级式MI的典型拓扑结构如图3-45所示，该结构采用**DC/DC变换器**和**DC/AC逆变器串联**结构，是两级变换器结构。
- **前级DC/DC变换器**：实现对光伏电池**MPPT**和光伏电池输出电压的**升压功能**，以满足后级DC/AC逆变器的并网逆变控制要求。
- **后级DC/AC逆变器**：完成**并网**和**直流稳压**控制，实现输入功率与输出**功率解耦控制**，然而相对于单级式MI而言，两级式MI其损耗相应增加。

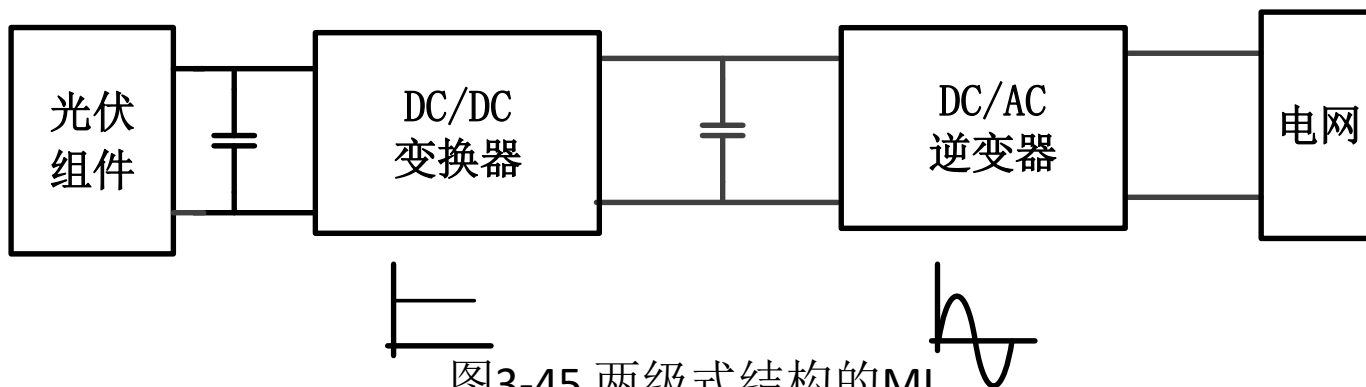


图3-45 两级式结构的MI



3.2 并网光伏逆变器

3.2.3.2 微型逆变器的基本拓扑结构

2. 按**功率变换级数**分类的微型逆变器 (MI) 拓扑

(2) **两级式**MI, 图3-46所示为典型的两级式微型逆变器电路拓扑--推挽式电压型高频链

- **前级**采用**推挽升压电路**, 适用于低压大电流的场合, 正好满足微型光伏发电系统的要求;
- **后级**采用单相全桥逆变电路, 采用SPWM控制, 再通过滤波电感得到220V、50Hz交流输出接入电网。

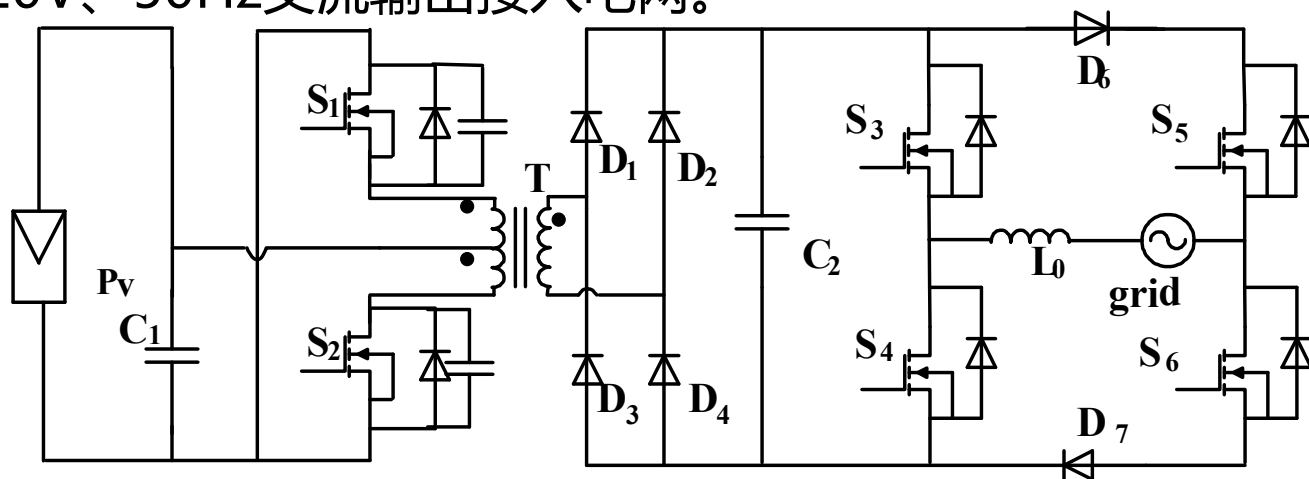


图3-46 采用**推挽式**电压型高频链结构的两级式MI电路



3.2 并网光伏逆变器

3.2.3.2 微型逆变器的基本拓扑结构

3. 按**直流母线结构**分类的微型逆变器拓扑

含直流母线结构、含伪直流母线结构和不含直流母线结构

(1) 含直流母线结构的微型逆变器

- 含直流母线结构的MI一般拓扑结构如图3-47所示，主电路可以分为DC/DC和DC/AC两级。

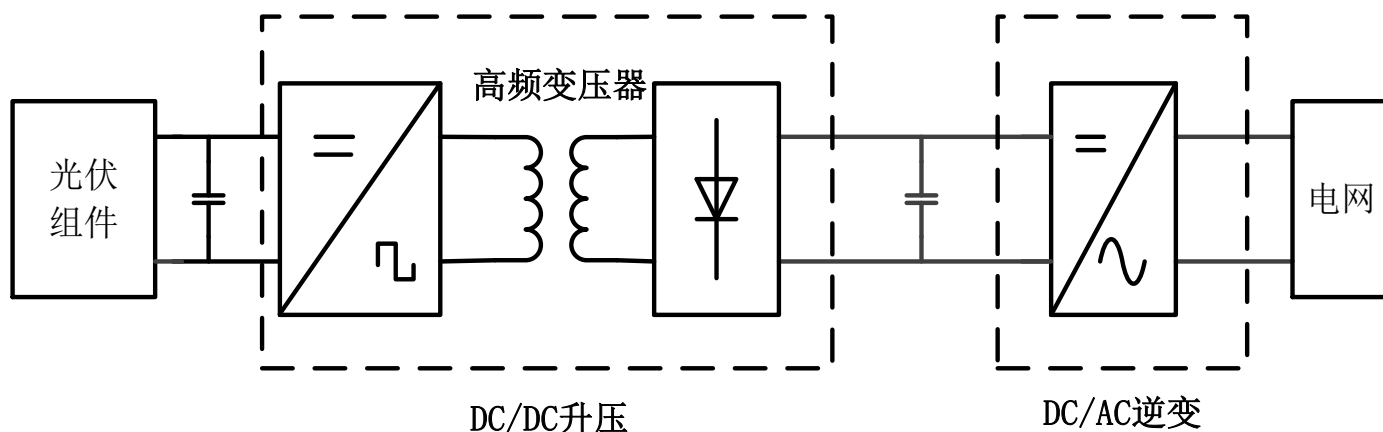


图3-47 含直流母线结构的MI一般拓扑结构

3.2 并网光伏逆变器

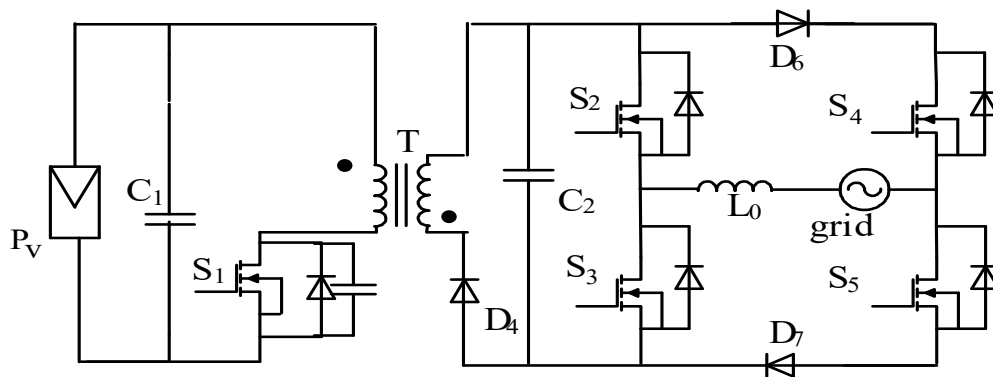
3.2.3.2 微型逆变器的基本拓扑结构

3. 按**直流母线结构**分类的微型逆变器拓扑

(1) 含直流母线结构的微型逆变器

- 含直流母线结构的MI主要有**反激式**、**推挽式**、**半桥式**和**全桥式**几种典型的拓扑结构。

图a所示拓扑是由**反激变换器**和**全桥逆变器**组成的反激式含直流母线的微型逆变器结构。桥路中增加了**2个辅助二极管**，一方面防止逆变器初始连接电网时的电流冲击，另一方面防止电网电流向直流侧回馈。



a) 反激式



3.2 并网光伏逆变器

3.2.3.2 微型逆变器的基本拓扑结构

3. 按**直流母线结构**分类的微型逆变器拓扑

(2) 含**伪直流母线**结构的微型逆变器

- 含伪直流母线结构的MI一般拓扑结构如图3-50所示。该拓扑类型控制简单，仅对前级控制即可，后级电路工作在工频状态，能有效降低开关管的损耗。

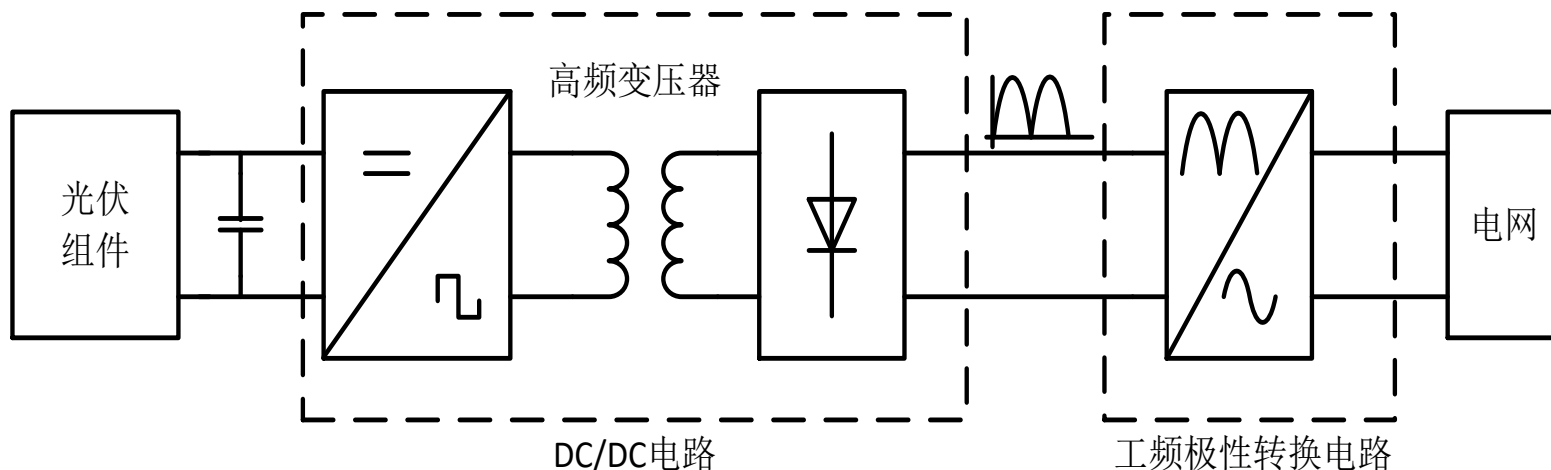


图3-50 含伪直流母线结构的MI一般拓扑结构

3.2 并网光伏逆变器

3.2.3.2 微型逆变器的基本拓扑结构

3. 按**直流母线结构**分类的微型逆变器拓扑

(2) 含**伪直流母线**结构的微型逆变器

- **LLC谐振变换器**可使功率器件在全负载范围实现**软开关**，从而提高系统的效率。。

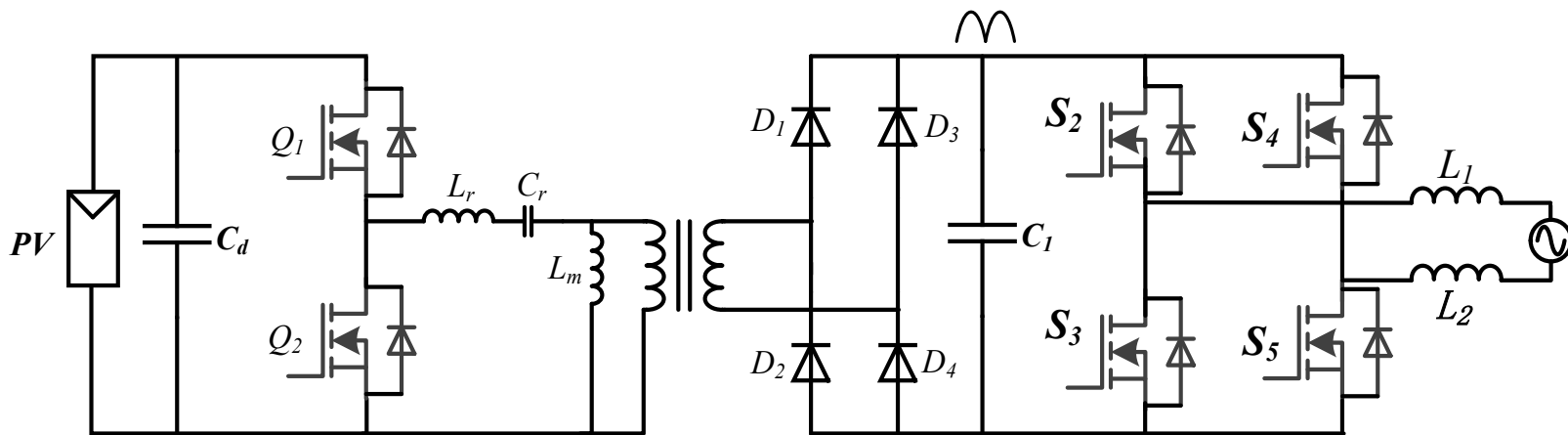


图3-52基于LLC变换器的含伪直流母线结构的MI拓扑



3.2 并网光伏逆变器

3.2.3.2 微型逆变器的基本拓扑结构

3. 按**直流母线结构**分类的微型逆变器拓扑

(3) 不含直流母线结构的微型逆变器

- 不含直流母线结构的MI一般拓扑结构如图3-53所示。这类MI实际上就是一种**周波变换型**高频链光伏并网逆变器。该类拓扑最大的**优点**在于没有直流母线，**不需要**耐高压、大容量的功率**解耦电容**，因此能够**增加**微型逆变器的**寿命**，**减小**微型逆变器的**体积**。

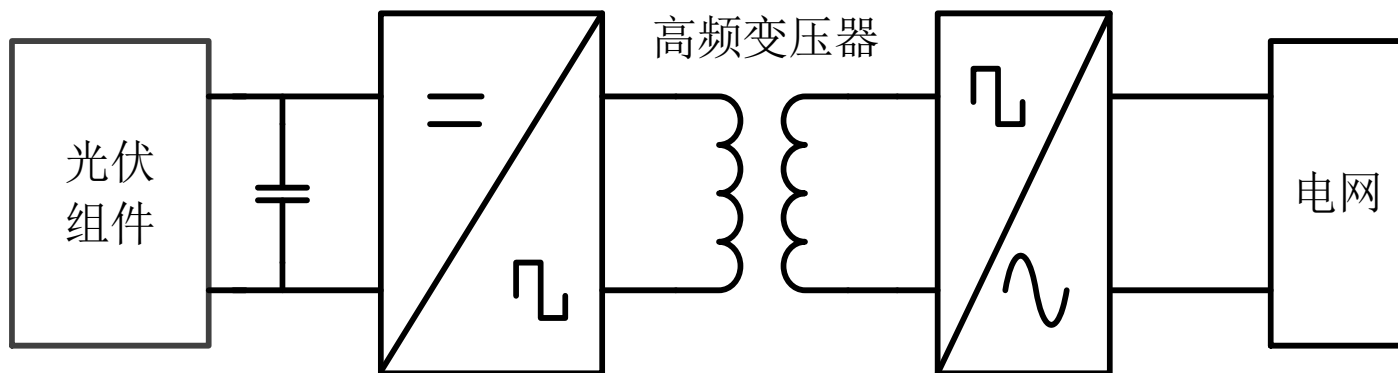


图3-53 不含直流母线结构的MI一般拓扑结构

3.2 并网光伏逆变器

3.2.3.2 微型逆变器的基本拓扑结构

3. 按**直流母线结构**分类的微型逆变器拓扑

(3) 不含直流母线结构的微型逆变器

- 如图3-54所示为一种基于串联谐振电路的微型逆变器结构。变压器原边开关具有**零电压开通**的特性，因此该电路理论上具有较高的效率。但是变频控制频率变化范围宽，滤波器设计困难。该电路拓扑原理上可以实现功率双向流动。

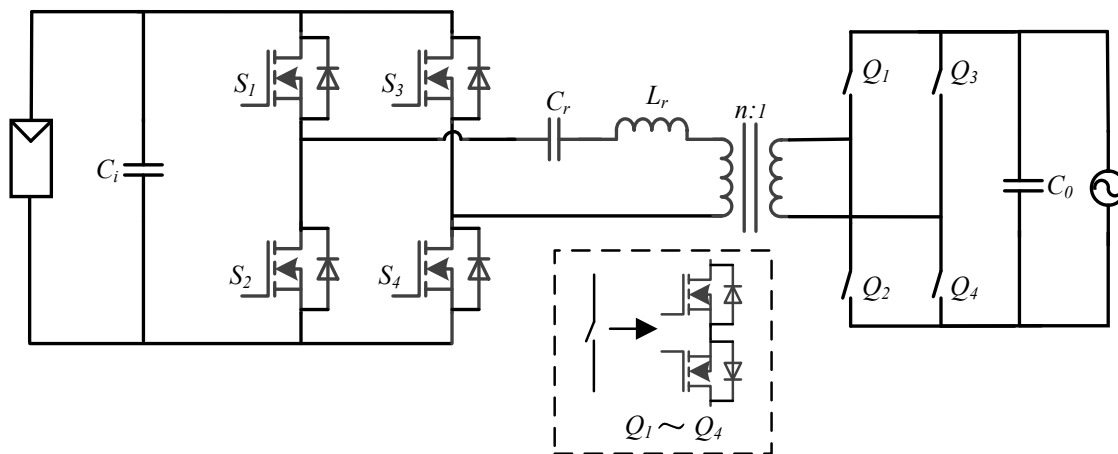


图3-54 无直流母线的串联谐振式MI拓扑



3.2 并网光伏逆变器

3.2.3.2 微型逆变器的基本拓扑结构

3. 按直流母线结构分类的微型逆变器拓扑

(4) 三类直流母线MI拓扑对比

表3.2 三类直流母线MI拓扑结构对比

		直流母线	伪直流母线	无直流母线	
控制方法	DC/DC	固定占空比	SPWM	周波高频链控制	
	DC/AC	SPWM	工频方波		
解耦电容	位置	直流母线	电池端	电池端	交流侧
	大小	中等	大	大	小
控制复杂度		简单（前后端独立控制）	中等（MPPT，电流波形控制在前级）	中等	复杂（功率解耦控制）
成本		中	低	高	高
效率		中	高	低	低
优点		两级独立控制	DC/AC损耗低	功率密度高	
缺点		DC/AC损耗高	DC/DC控制较复杂	双向开关，高频链控制	

采用**伪直流母线结构的反激式逆变电路**具有结构简单、元件数量少等优点，得到了业界MI产品的广泛应用。



3 并网光伏发电及逆变器技术

3.1

并网光伏发电系统的体系结构

3.2

并网光伏逆变器

3.3

光伏系统的最大功率点跟踪技术

3.4

光伏系统PID效应及防护措施



3.3 光伏系统的最大功率点跟踪 (MPPT) 技术

3.3.1 概述

- ◆ 由于光伏电池的**输出阻抗**受环境因素的影响，因此，如果能通过控制方法实现对**负载阻抗**的实时调节，并使其**跟踪**光伏电池的输出阻抗，就可以实现光伏电池的MPPT控制。
- ◆ 为了方便讨论，**光伏电池的等效阻抗** R_{opt} 被定义成最大功率点电压 U_{mpp} 和最大功率点电流 I_{mpp} 的比值，即

$$R_{opt} = U_{mpp} / I_{mpp}$$

- ◆ 显然，当外界环境发生变化时， R_{opt} 也将发生变化。但是，由于实际应用中的光伏电池是向一个特定的负载传输功率，因此就存在一个负载匹配的问题。
- ◆ 光伏电池的伏安特性与负载特性及其匹配的过程如图3-56所示，图中**光伏电池的负载特性**以一过坐标原点的电阻特性表示。

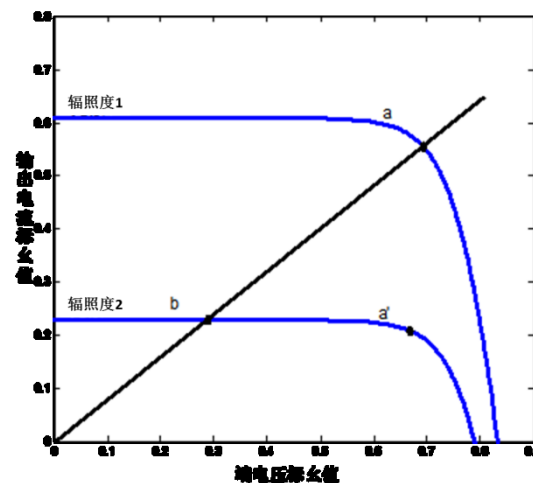


图3-56 光伏电池的伏安特性与负载特性的匹配



3.3 光伏系统的最大功率点跟踪 (MPPT) 技术

3.3.2 基于输出特性曲线的开环MPPT方法

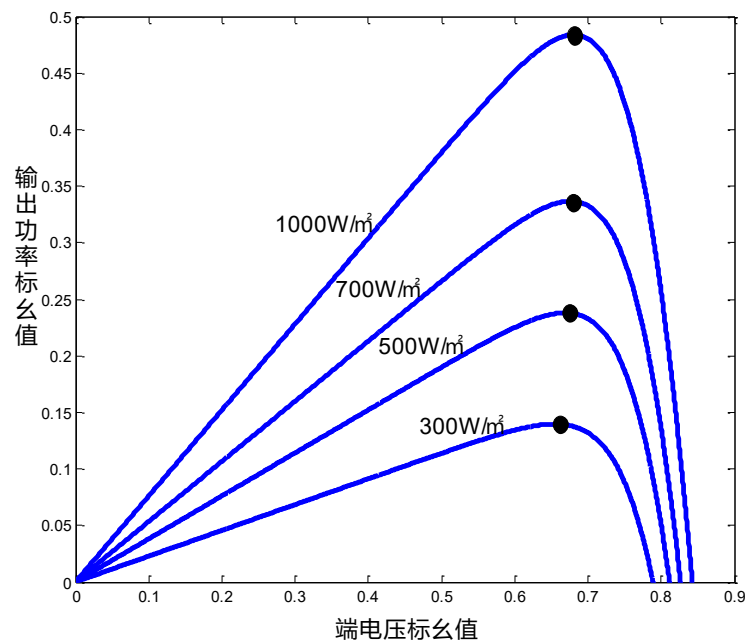
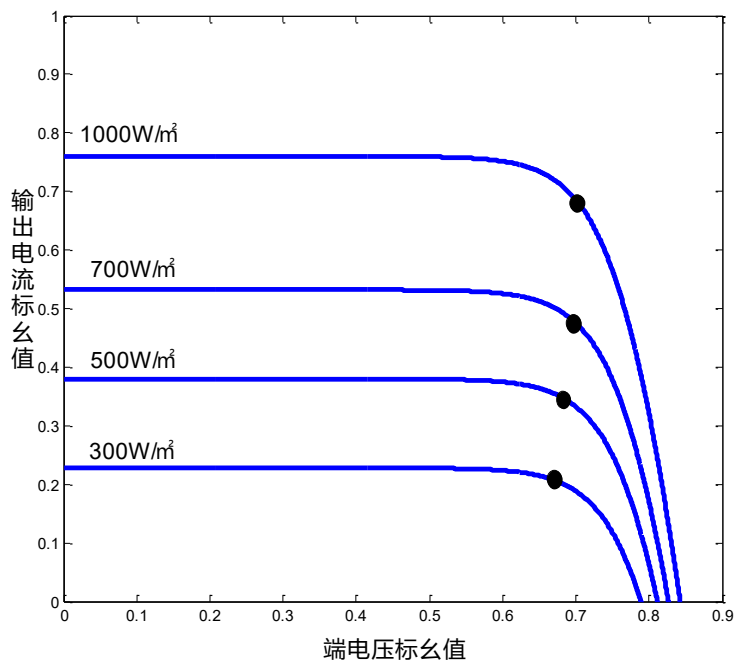


图3-57 相同温度而不同辐照度条件下光伏电池特性

a) U-I特性

b) P-U特性

当温度相同时，随着辐照度的增加，光伏电池的**开路电压几乎不变**，而短路电流、最大输出功率则有所增加，可见辐照度变化时主要影响**光伏电池的输出电流**；



3.3 光伏系统的最大功率点跟踪 (MPPT) 技术

3.3.2 基于输出特性曲线的开环MPPT方法

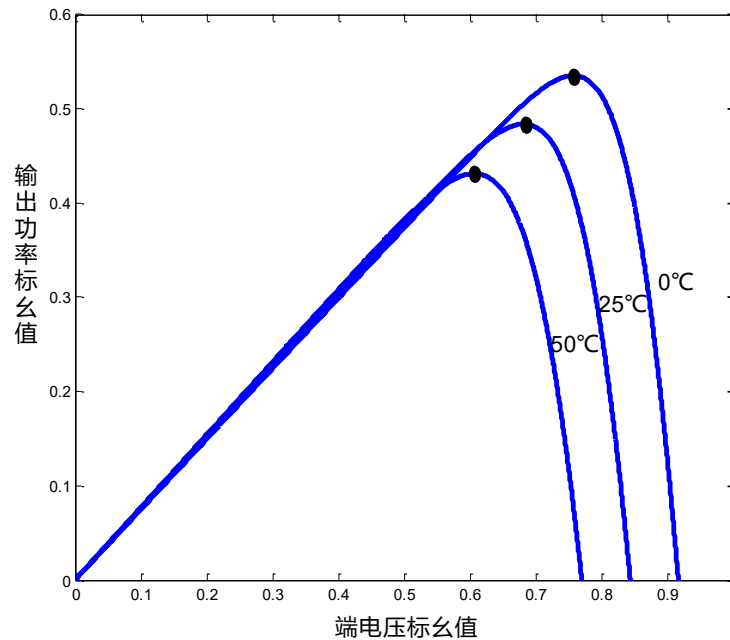
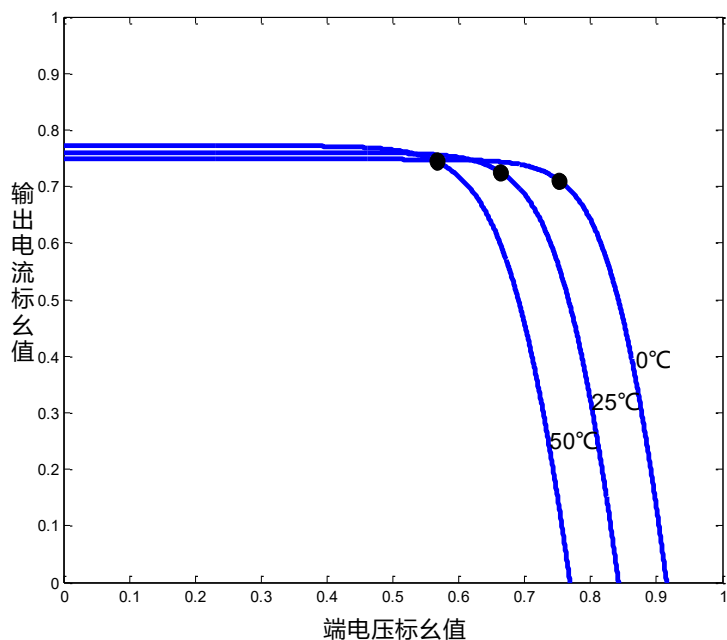


图3-58 相同辐照度而不同温度条件下光伏电池特性

a) U-I特性

b) P-U特性

当辐照度相同时，随着温度的增加，**光伏电池的短路电流几乎不变**，而开路电压、最大输出功率则有所减小，可见温度变化时主要影响**光伏电池的输出电压**。



3.3 光伏系统的最大功率点跟踪 (MPPT) 技术

3.3.2.1 定电压跟踪法

- 在辐照度**大于**一定值并且**温度变化不大**，若能将光伏电池输出电压控制在其最大功率点附近上的某一定电压处，光伏电池将获得近似的最大功率输出，这种MPPT控制称为**定电压跟踪法**。
- 光伏电池的最大功率点电压 U_{mpp} 与光伏电池的开路电压 U_{oc} 之间存在近似的线性关系，即

$$U_{mpp} = k_1 U_{oc} \quad (3-25)$$

其中，系数 k_1 的值取决于光伏电池的特性，一般 k_1 的取值大约在 0.8 左右。

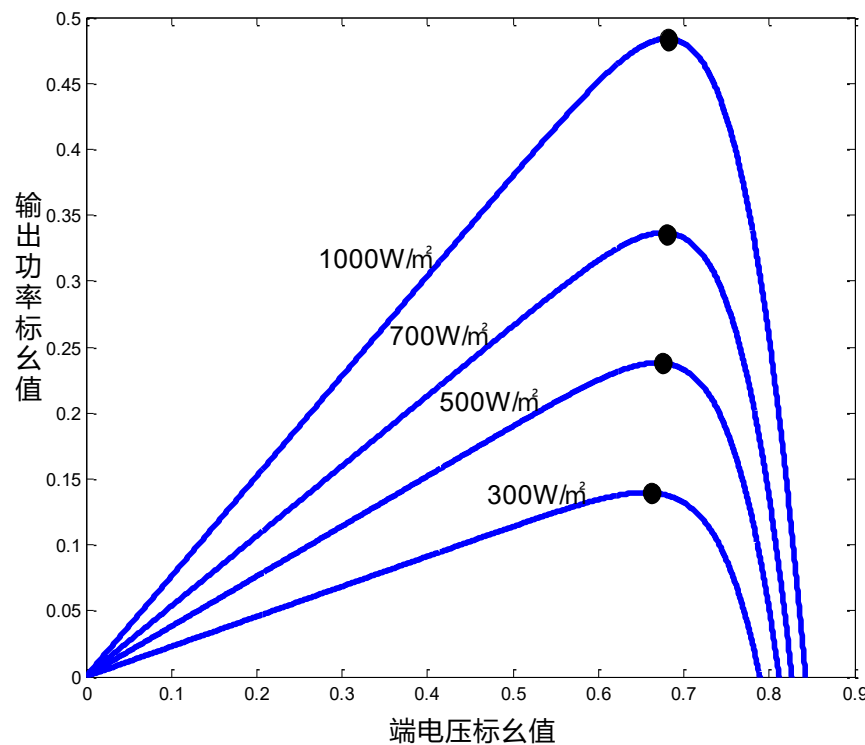


图3-57 相同温度而不同辐照度条件下光伏电池特性，P-U特性



3.3 光伏系统的最大功率点跟踪 (MPPT) 技术

3.3.2.1 定电压跟踪法

- 定电压跟踪法实际上是一种**开环的MPPT算法**，其控制简单快速，但由于忽略了温度对光伏电池输出电压的影响，因此，**温差越大**，定电压跟踪法跟踪最大功率点的**误差也就越大**。
- 虽然定电压跟踪法难以准确实现MPPT，但其具有控制简单并快速接近最大功率点的优点，因此电压跟踪法常与其他**闭环MPPT方法组合**使用这种组合的MPPT方法可以有效降低启动过程中对远离最大功率点区域进行搜索所造成的功率损耗。
- 电压跟踪法一般仅用于低价且控制要求不高的简易光伏系统中。



3.3 光伏系统的最大功率点跟踪 (MPPT) 技术

3.3.2.2 短路电流比例系数法

- 在辐照度大于一定值并且温度变化不大时，光伏电池的输出U-I曲线最大功率点电流 I_{mpp} 与光伏电池短路电流 I_{sc} 也存在近似的线性关系

$$I_{mpp} = k_2 I_{sc} \quad (3-26)$$

其中，系数 k_2 的值取决于光伏电池的特性，一般 k_2 的取值大约在0.9左右。

- 上述定电压跟踪法和短路电流比例系数法均属于开环的MPPT算法，其主要优点就是控制简单，但不是工作在真正的MPP上。

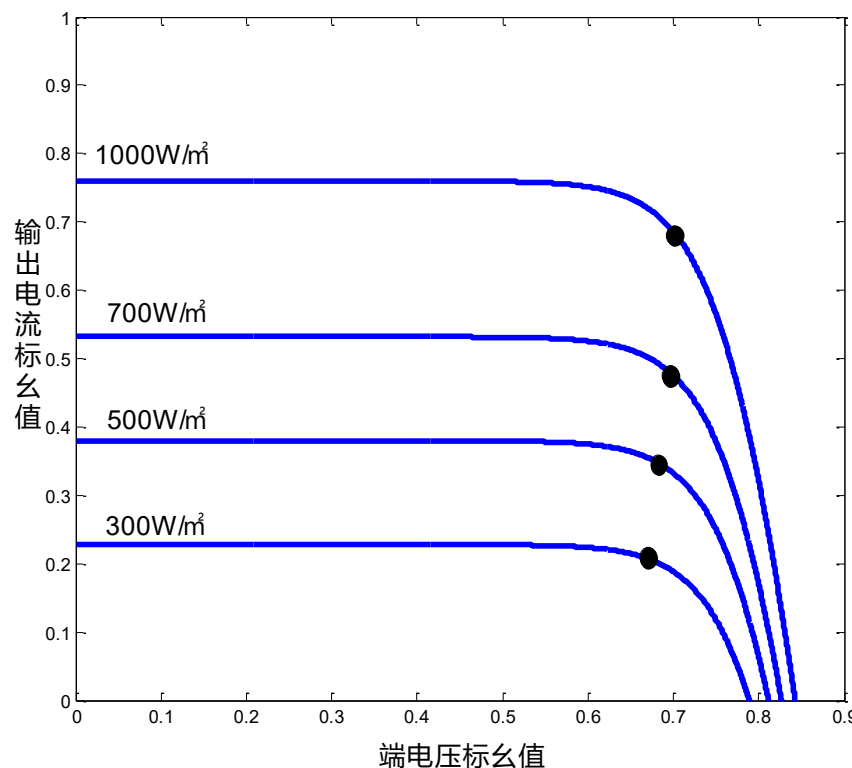


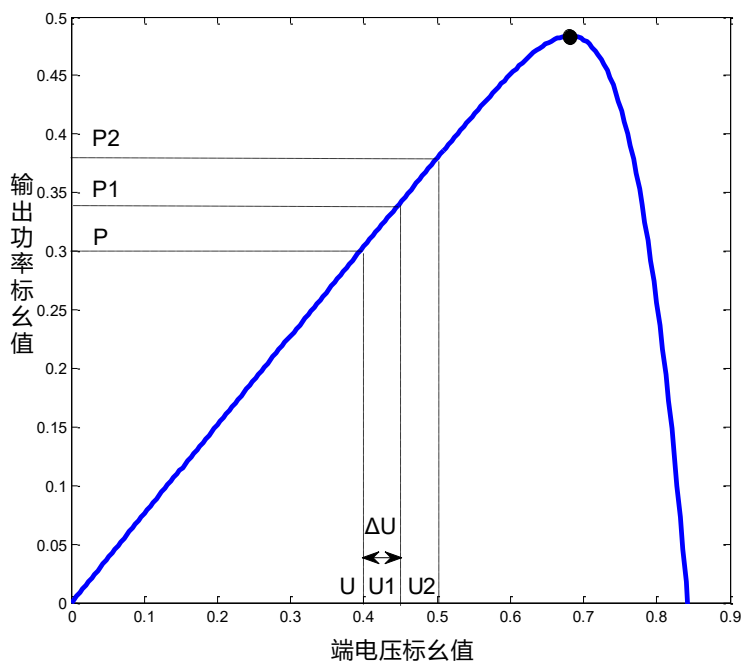
图3-57 相同温度而不同辐照度条件下光伏电池特性，U-I特性



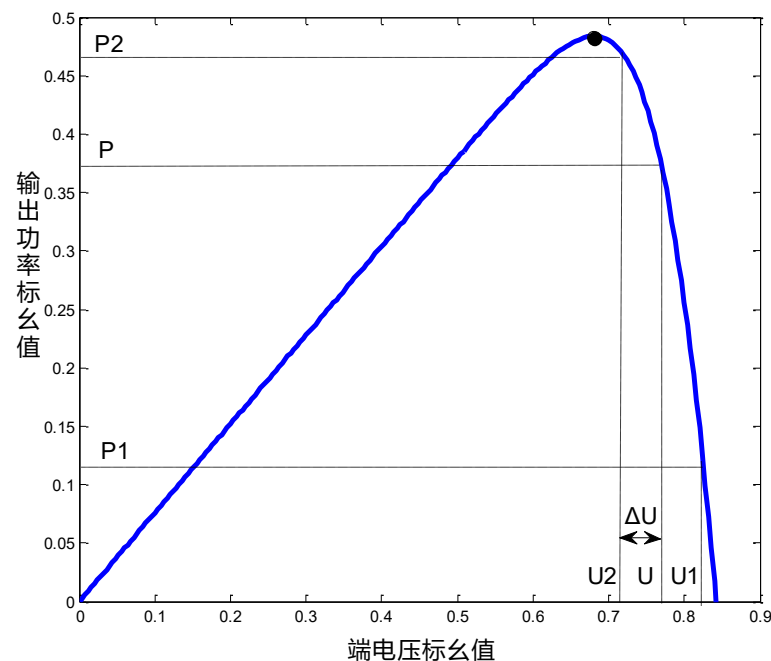
3.3 光伏系统的最大功率点跟踪 (MPPT) 技术

3.3.3 扰动观测法 (P & O法)

3.3.3.1 扰动观测法的基本原理



a) 增大电压后需继续采用**增大**电压扰动的过程



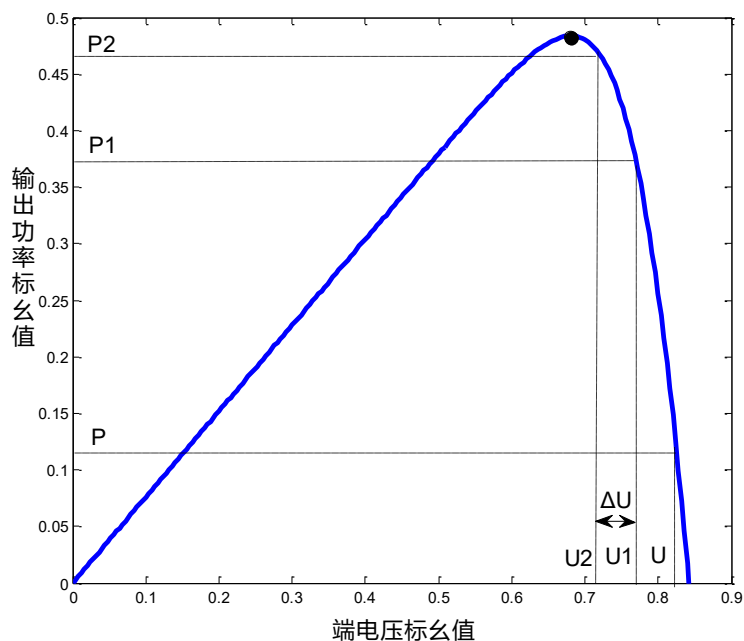
b) 增大电压后需采用**减小**电压扰动的过程



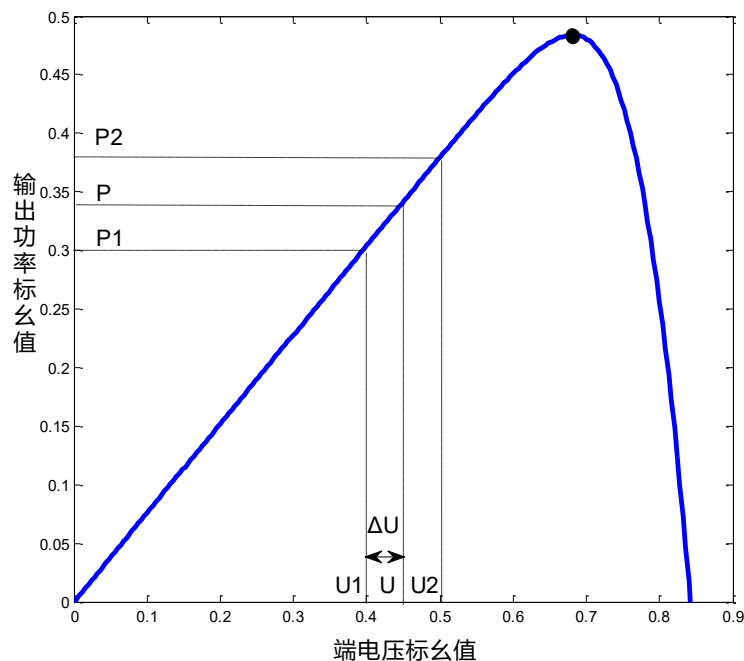
3.3 光伏系统的最大功率点跟踪 (MPPT) 技术

3.3.3 扰动观测法 (P & O法)

3.3.3.1 扰动观测法的基本原理



c) 减小电压后需继续采用**减小**电压扰动的过程



d) 减小电压后需采用**增大**电压扰动的过程



3.3 光伏系统的最大功率点跟踪 (MPPT) 技术

扰动观测法就是反复进行输出电压扰动，从而使**光伏电池输出功率朝大的方向改变**，直到工作点接近最大功率点。扰动观测法按每次扰动的电压变化量是否固定，可以分为**定步长**扰动观测法和**变步长**扰动观测法两类，定步长扰动观测法的流程图如图3-60所示。

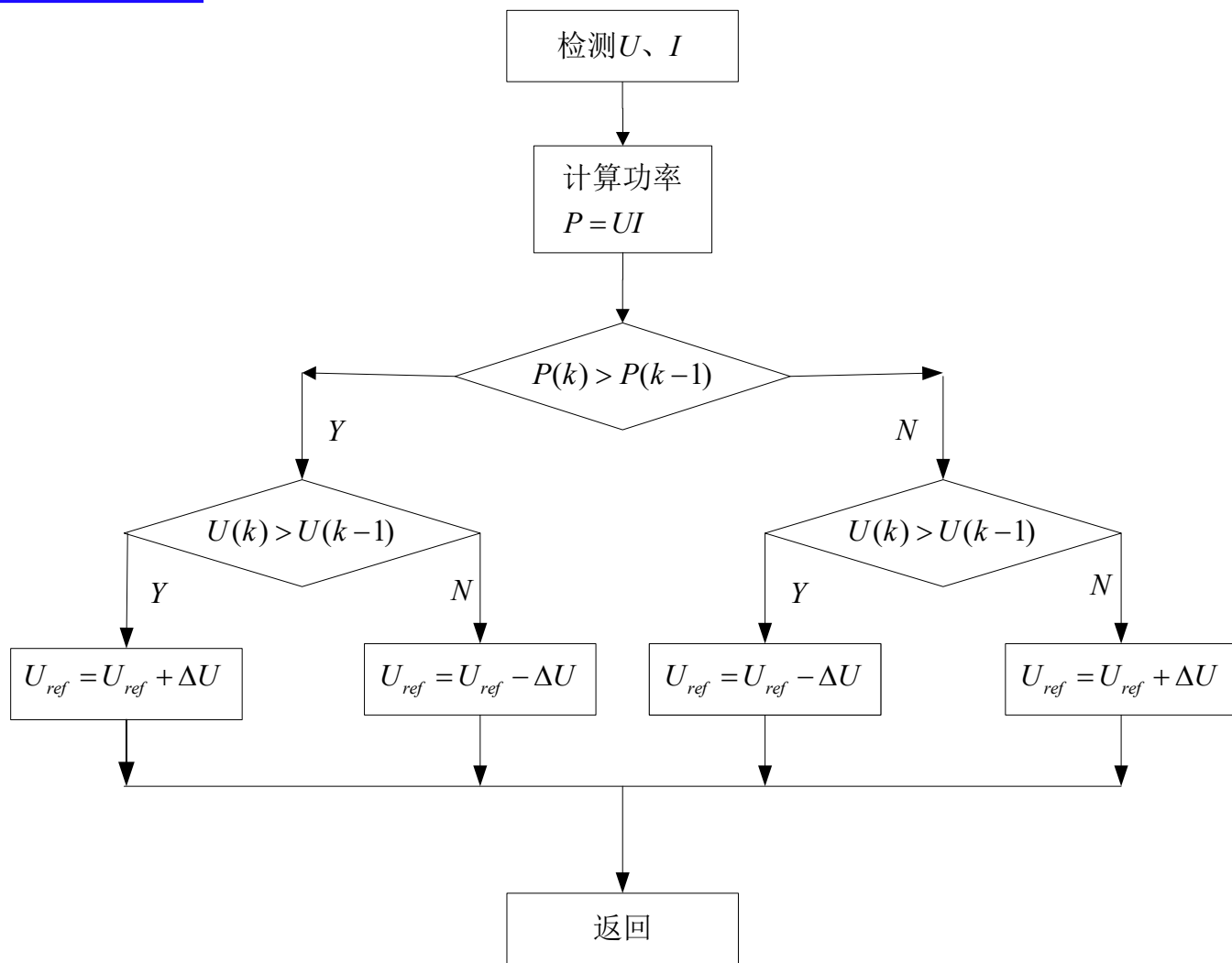


图3-60 定步长扰动观测法的流程图



3.3 光伏系统的最大功率点跟踪 (MPPT) 技术

3.3.3.2 扰动观测法的振荡与误判问题

1. 扰动观测法的振荡分析

第一种情况

1) 若 $P_2 < P_1$, 则系统应改变扰动方向, 减小工作点电压值, 即 $U_3 = U_2 - \Delta U$, 因此调整后工作点将位于 P_3 点上, P_3 点应与 P_1 点重合。由于 $P_3 < P_2$, 因此, 系统还将继续减小工作点电压值, 即 $U_4 = U_3 - \Delta U$, 这样系统的工作点将向远离最大功率点的方向调整, 而使工作点位于最大功率点左侧的 P_4 (U_4) 点上。此时, 由于 $P_4 < P_3$, 系统才将改变扰动方向, 使工作点向最大功率点靠近, 重新回到 P_1 点。由于 $P_2 < P_1$, 系统继续之前的扰动方向, 开始新一轮的振荡过程。这样, 光伏电池的输出功率会在最大功率点附近以 P_2 - P_3 (P_1)- P_4 三点方式振荡。

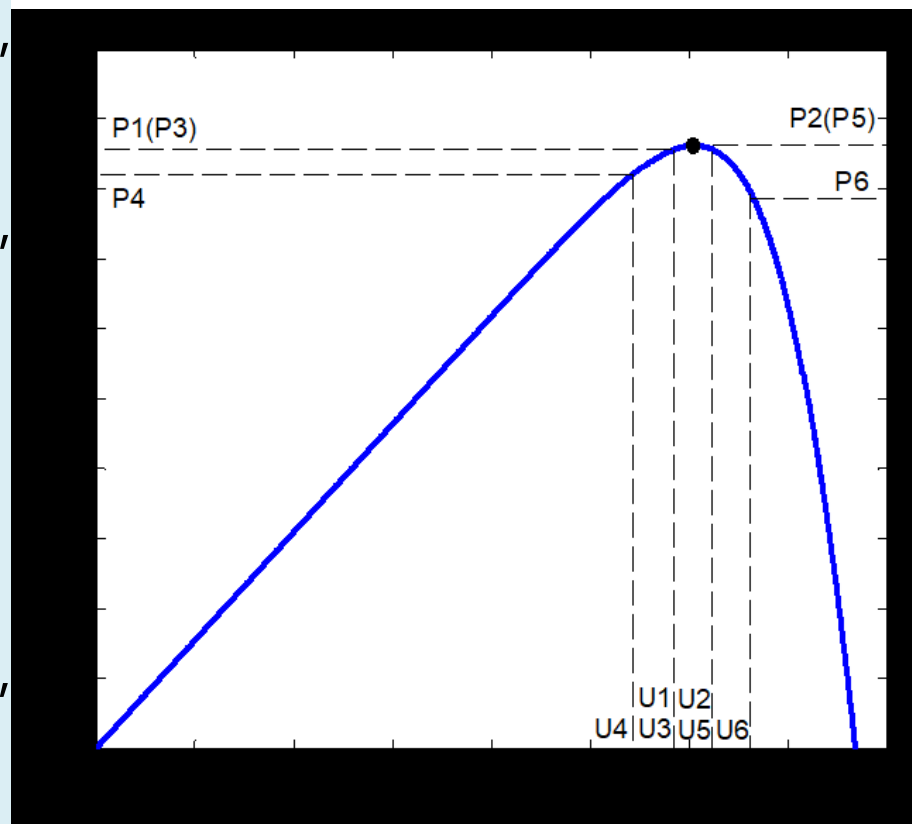


图3-61 扰动观测法电压扰动的第一种情况示意图



3.3 光伏系统的最大功率点跟踪 (MPPT) 技术

3.3.3.2 扰动观测法的振荡与误判问题

1. 扰动观测法的振荡分析

第一种情况

2) 若 $P_2 > P_1$, 则系统将继续增大工作点电压值, 即 $U_6 = U_2 + \Delta U$, 而使工作点位于最大功率点右侧的 P_6 (U_6) 点上。此时, 由于 $P_6 < P_2$, 系统才将改变扰动方向, 使工作点向最大功率点附靠近, 调整后系统的工作点将位于点 P_5 上。 P_5 点应与 P_2 点重合, 因此, 系统继续减小工作点电压值, 回到 P_1 点。由于 $P_1 < P_5$, 系统改变扰动方向, 开始新一轮的振荡过程。这样, 光伏电池的输出功率会在最大功率点附近以 **P_1 - P_2 (P_5)- P_6 三点方式振荡。**

3) 若 $P_2 = P_1$, 将导致工作点在 P_1 和 P_2 两点之间跳变, 即以 P_1 - P_2 两点方式振荡。

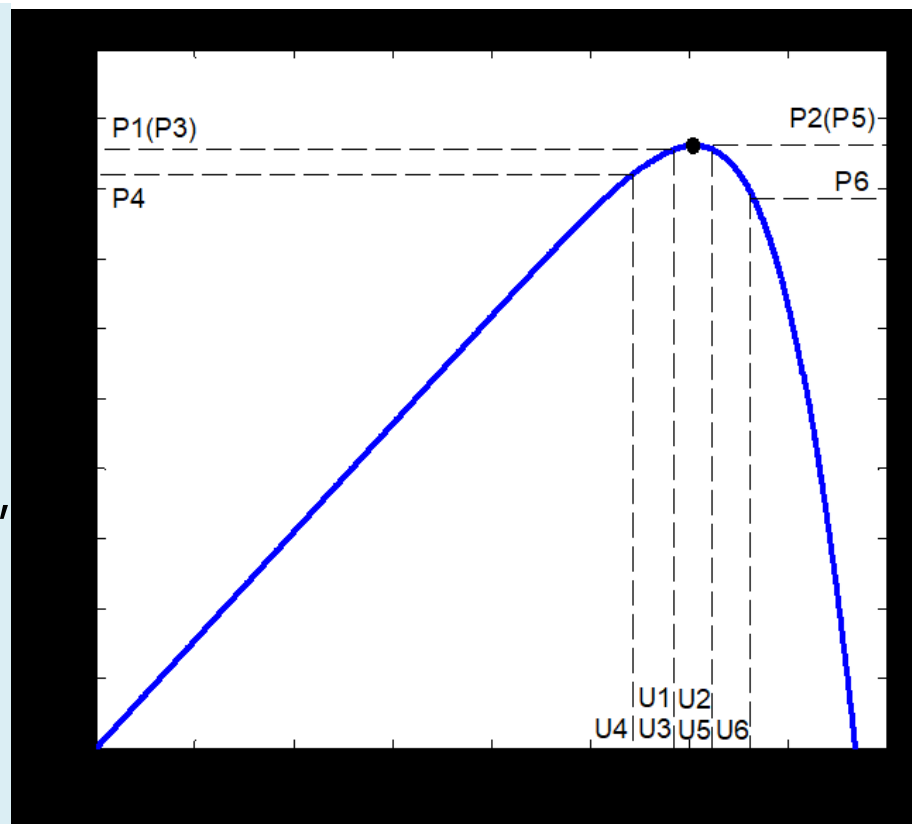


图3-61 扰动观测法电压扰动的第一种情况示意图



3.3 光伏系统的最大功率点跟踪 (MPPT) 技术

3.3.3.2 扰动观测法的振荡与误判问题

1. 扰动观测法的振荡分析

第二种情况

调整后系统的工作点正好是最大功率点 P_{mpp} ，其电压扰动及三点振荡的过程如图3-62所示。当 U_2 恰好为最大功率点对应电压值时，系统将在 P_1 - P_{mpp} - P_3 之间循环振荡。

基于扰动观测法的MPPT控制**一定存在功率点附近的振荡**，振荡的基本形式有**两点振荡**和**三点振荡**，产生振荡的根本原因是电压扰动的不连续（即有一定的步长）所导致的，振荡的后果将产生能量的损失。

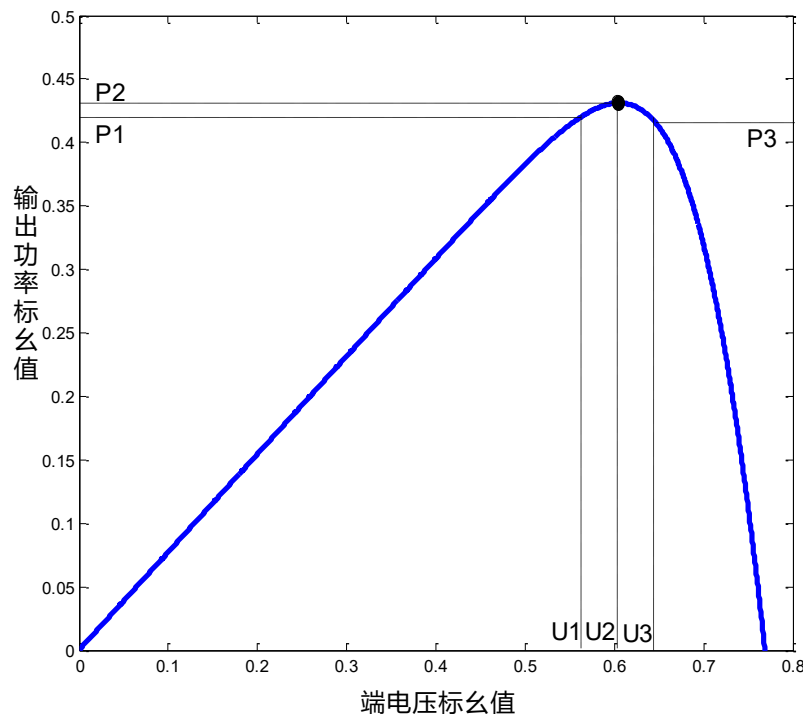


图3-62 扰动观测法电压扰动第二种情况示意图



3.3 光伏系统的最大功率点跟踪 (MPPT) 技术

3.3.3.2 扰动观测法的振荡与误判问题

2. 扰动观测法的误判分析

当辐照度发生一定幅度的突变时，如果按照上述定步长的扰动观测法进行MPPT控制时，就有可能发生误判。

假设光伏系统工作在最大功率点左侧时，此时工作电压记为 U_a ，光伏电池输出功率记为 P_a ，当电压向右扰至 U_b 时：

- 如果辐照度不变，光伏电池的输出功率满足 $P_b > P_a$ ，扰动观测法工作正确；
- 如果辐照度变小，则对应 U_b 的输出功率有可能满足 $P_c < P_a$ ，此时，扰动观测法会误判电压扰动方向，从而使工作点左移回到 U_a 点；

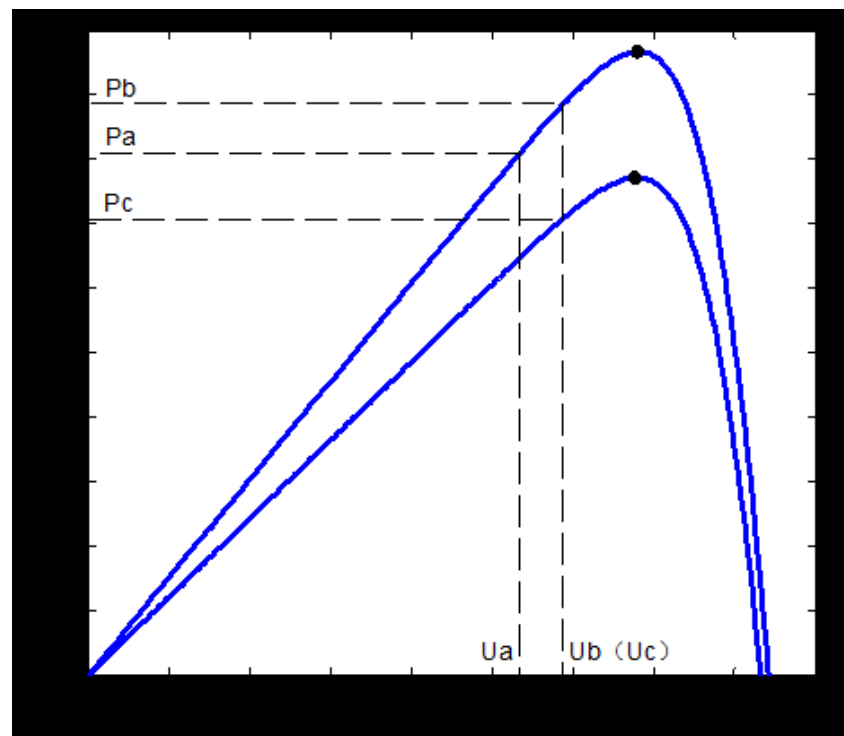


图3-63 扰动观测法可能发生误判的示意图



3.3 光伏系统的最大功率点跟踪 (MPPT) 技术

3.3.3.3 扰动观测法的改进

1. 基于变步长的扰动观测法

- 当工作点在**远离MPP**时，采用**较大的电压扰动步长**以提高跟踪速度，减少光伏电池在低功率输出区的时间；而当**工作点接近MPP**时，采用**较小的电压扰动步长**以保证跟踪精度。
- **逐步逼近法**是一种较为为实用的基于变步长的扰动观测法，具体的变步长搜索过程简述如：
 - 假定初始**工作点**工作在P-U特性曲线最大功率点的**左边**，并且远离最大功率点，此时应以某一较大的步长**m**进行搜索，当 $P_{i+1} < P_i$ 满足时，说明当前工作点工作在最大功率点的**右端**，此时便可以估计出最大功率点的范围应在两个初始步长**2m**范围内；
 - 改变搜索的方向，并且以**m/2**为步长进行搜索，直到出现搜索方向第二次改变时，届时最大功率点的范围应在一个初始步长m范围内，从而使跟踪精度提高一倍。此后再次改变搜索方向，并且以**m/4**为步长进行搜索，而搜索到的最大功率点的范围应在步长m/2范围内，使跟踪精度再次提高一倍。依此类推，直到搜索到给定的精度范围内时，就认为搜索到了最大功率点。



3.3 光伏系统的最大功率点跟踪 (MPPT) 技术

3.3.3.3 扰动观测法的改进

2. 基于功率预测的扰动观测法

- 令 kT 时刻电压 U_k 处工作点测得的功率为 $P(k)$ ，此时并不对参考电压施加扰动，而在 kT 时刻后的半个采样周期的 $(k+1/2)T$ 时刻增加一次功率采样，若令测得的功率为 $P(k+1/2)$ ，则可得基于一个采样周期的预测功率为 $P'(k) = 2P(k+1/2) - P(k)$ 。
- 在 $(k+1/2)T$ 时刻使参考电压增加 ΔU ，并令在 $(k+1)T$ 时刻测得电压 $U(k+1)$ 处的功率为 $P(k+1)$

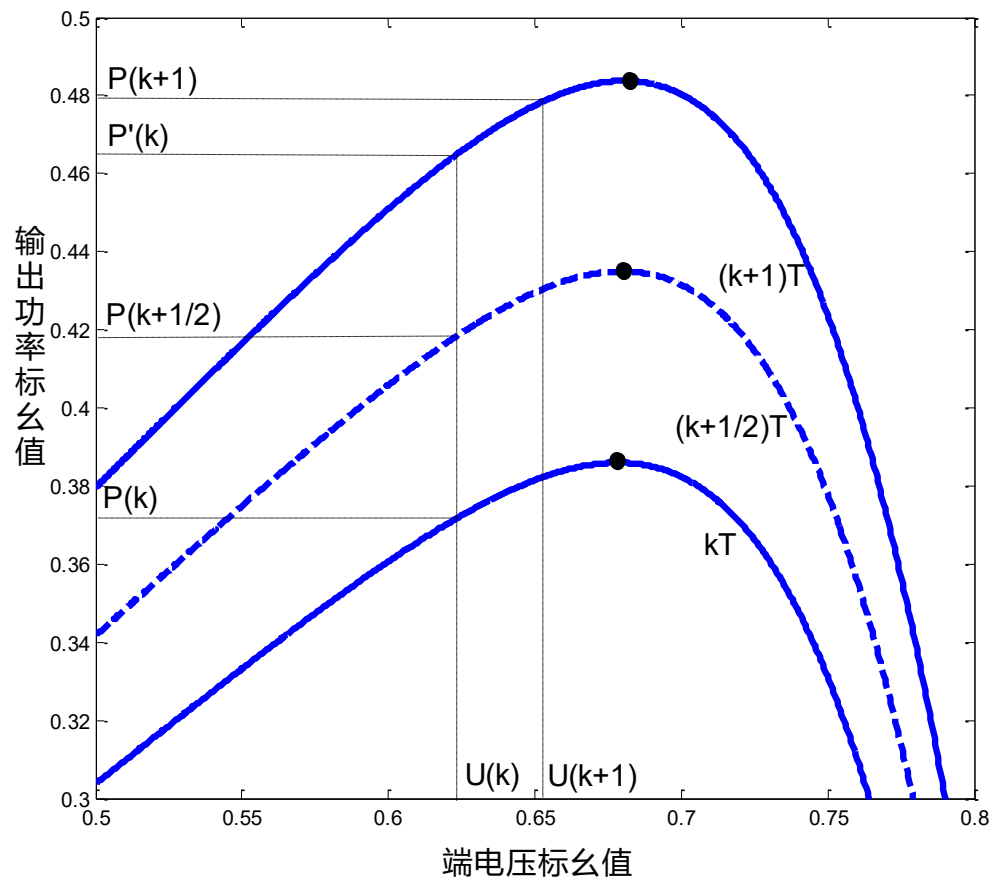


图3-64 功率预测示意图



3.3 光伏系统的最大功率点跟踪 (MPPT) 技术

3.3.3.3 扰动观测法的改进

3. 基于滞环比较的扰动观测法

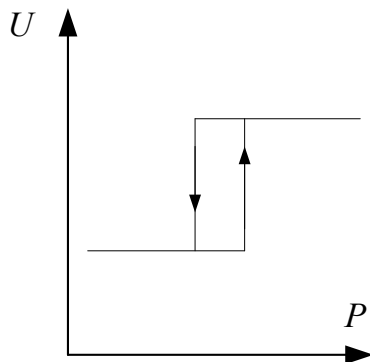


图3-65 滞环控制特性

当功率在所设的**滞环内**出现波动时，光伏电池的工作点电压保持不变，只有当功率的波动量**超出所设的滞环**时，才按照一定规律改变工作点电压。可见，滞环控制特性的引入，可以有效地抑制扰动观测法的振荡现象。

在扰动观测法的MPPT过程中，已知A点（当前工作点）和B点（按照上一步判断给出的方向将要测量的点），而对于增加的另一C点的确定，则有两个选择，即**B点反方向两个步长**或**正方向一个步长**所对应的工作点，如图3-66所示。

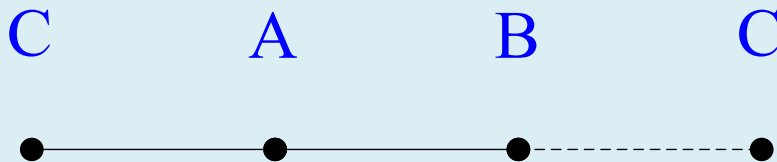


图3-66 C点的位置示意图



3.3 光伏系统的最大功率点跟踪 (MPPT) 技术

3.3.3.3 扰动观测法的改进

3. 基于滞环比较的扰动观测法

若以当前工作点A点为出发点，依据判定的扰动方向扰动至B点，之后再反向两个步长扰动至C点，如果C, A, B的功率测量值依次为 P_C 、 P_B 、 P_A ，则通过功率值的比较，可得出如图3-67所示的九种可能情形： $P_A > P_C$ 时记为“+”， $P_B > P_A$ 时记为“+”，反之均记为“-”。

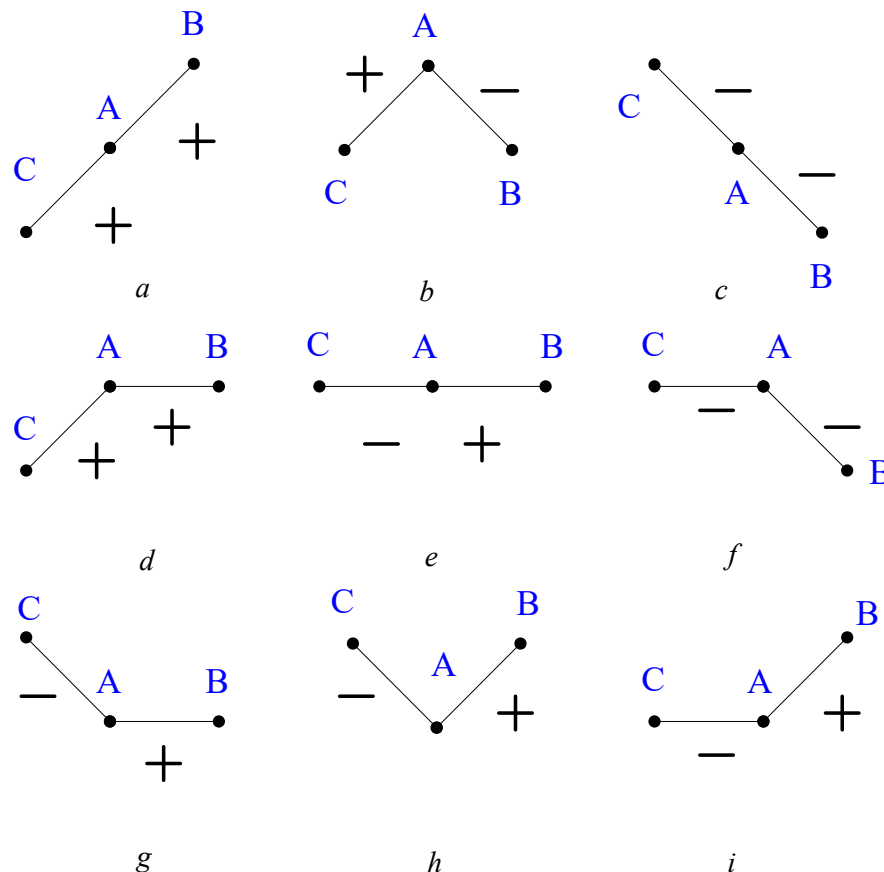


图3-67 三点之间功率比较可能出现的关系示意图



3.3 光伏系统的最大功率点跟踪

3.3.3.3 扰动观测法的改进

3. 基于滞环比较的扰动观测法

基于滞环的电压扰动规则如下：

- 如果两次扰动的功率比较均为 “+” ，则向电压值增大方向扰动；
- 如果两次扰动的功率比较均为 “-” ，则向电压值减小方向扰动；
- 如果两次扰动的功率比较有 “+” 有 “-” ，可能已经达到最大功率点或者外部辐照度变化很快，则电压值不变。

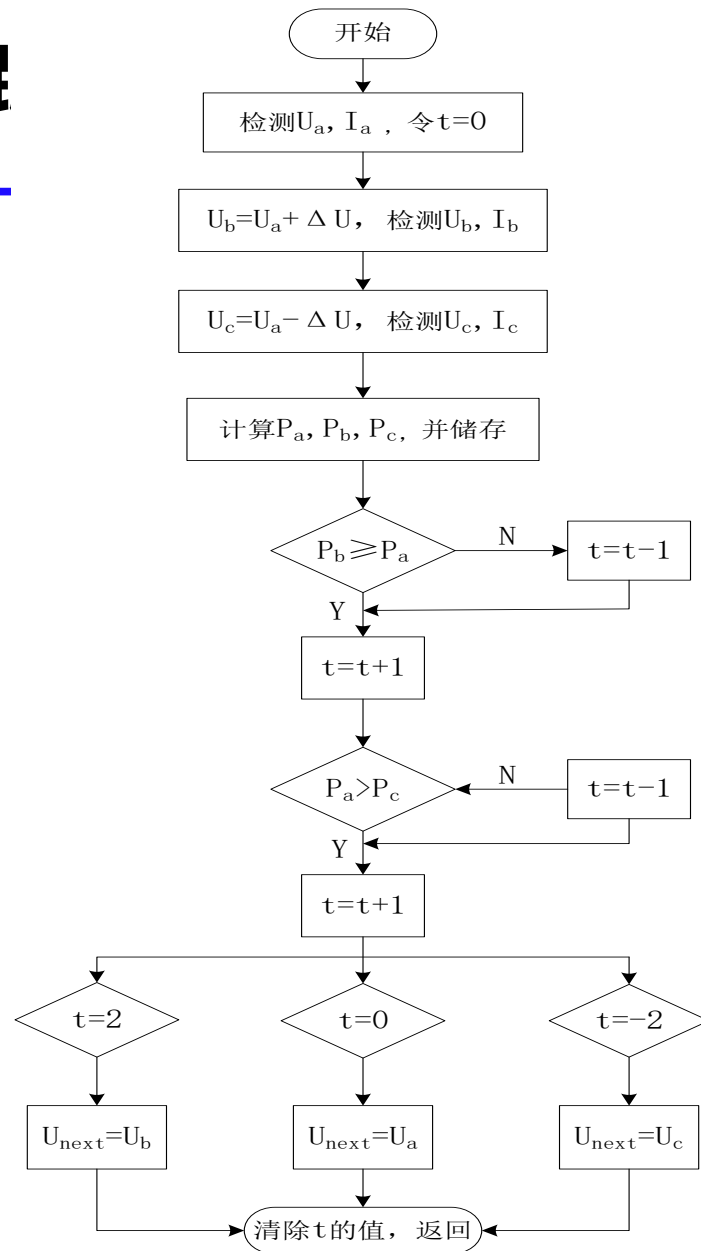


图3-69 滞环比较法流程图



3.3 光伏系统的最大功率点跟踪 (MPPT) 技术

3.3.4 电导增量法 (INC)

- **基本原理**：从光伏电池**输出功率**随**输出电压变化率**规律出发，推导出系统工作点位于最大功率点时的电导和**电导变化率**之间的关系，进而提出相应的MPPT算法。

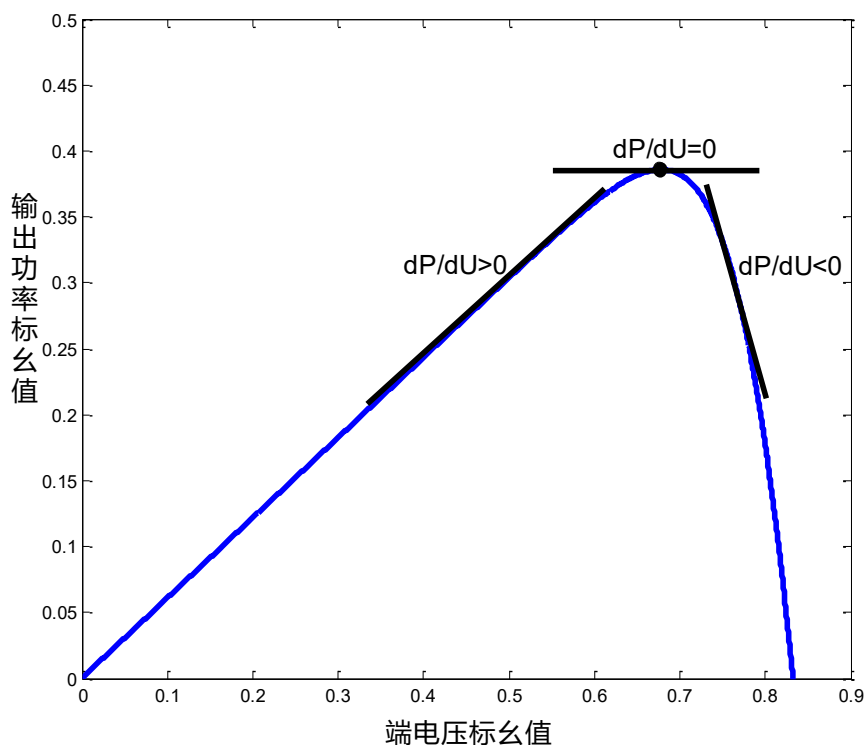


图3-70给出了光伏电池P-U特性曲线及 dP/dU 变化特征，即在辐照度一定的情况下仅存在一个最大功率点，且在最大功率点两边 dP/dU 符号相异，而在最大功率点处 $dP/dU = 0$ 。



3.3 光伏系统的最大功率点跟踪 (MPPT) 技术

3.3.4 电导增量法 (INC)

光伏电池的瞬时输出功率为

$$P=IU \quad (3-38)$$

将式(3-38)两边对光伏电池的输出电压 U 求导, 则

$$\frac{dP}{dU} = I + U \frac{dI}{dU} \quad (3-39)$$

当 $dP/dU=0$ 时, 光伏电池的输出功率达到最大。

可以推导出工作点位于最大功率点时需满足以下关系:

$$I + U \frac{dI}{dU} = 0 \quad (3-40)$$

实际中以近似代替, 则使用电导增量法 (INC) 进行最大功率点跟踪时判据如下:

$$\begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta U} > -\frac{I}{U} & \text{最大功率点左边} \\ \frac{\Delta I}{\Delta U} = -\frac{I}{U} & \text{最大功率点} \\ \frac{\Delta I}{\Delta U} < -\frac{I}{U} & \text{最大功率点右边} \end{cases}$$



3.3 光伏系统的最大功率

3.3.4 电导增量法 (INC)

采用定步长的电导增量法实现流程图如图3-71所示，其中 ΔU^* 为每次系统调整工作点时固定的电压改变量（步长）。从图中可以看出，计算出 ΔU 之后，对其是否为零进行判定，使流程图出现两条分支，其中：左分支与上述分析相吻合；**而右分支则主要是为抑制当外部辐照度发生突变时的误判而设置的。**

采用电导增量法的主要**优点**是MPPT的控制稳定度高，且与光伏电池的特性及参数无关。然而，电导增量法对控制系统要求则相对较高。

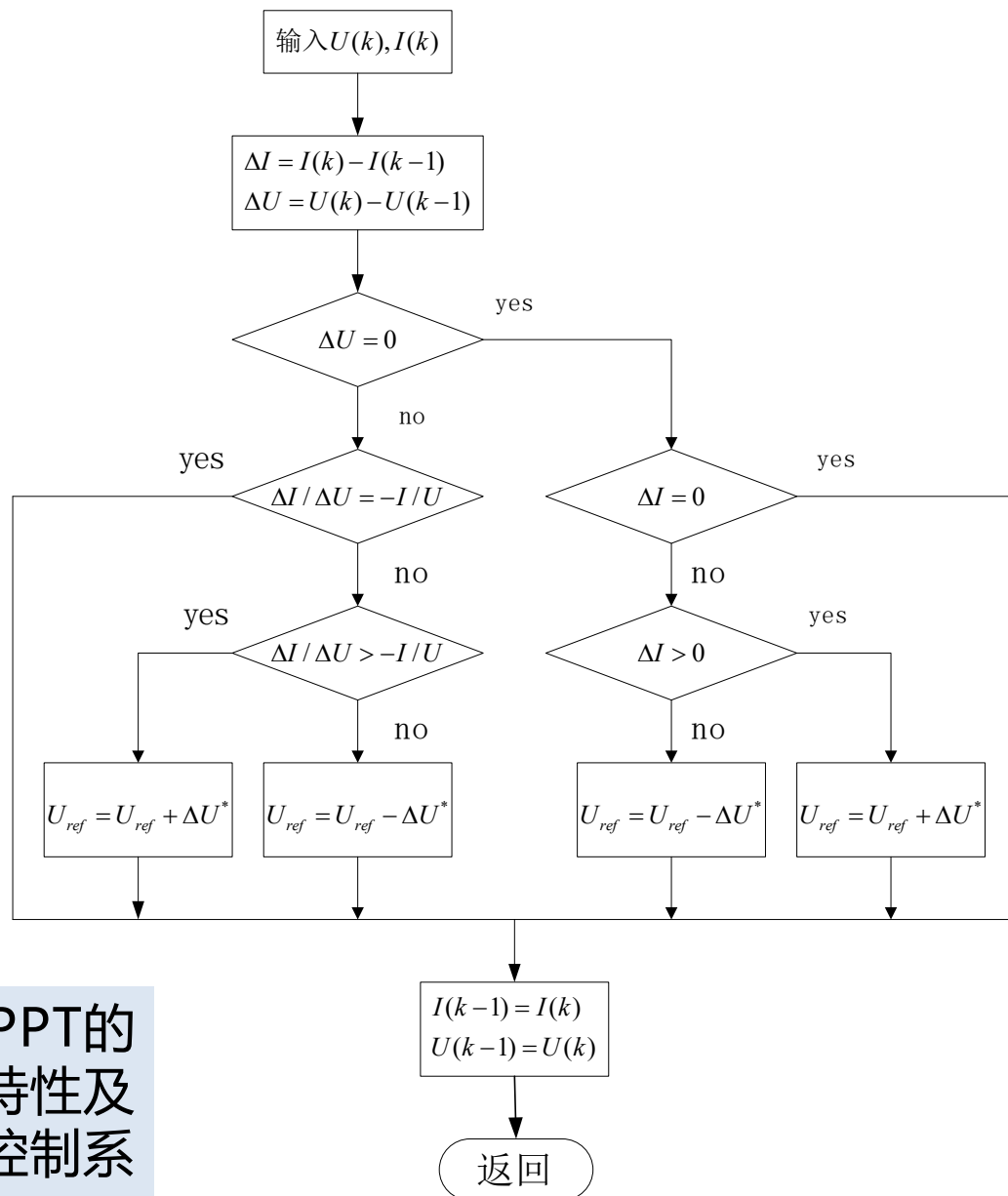


图3-71 电导增量法流程图



3 并网光伏发电及逆变器技术

3.1

并网光伏发电系统的体系结构

3.2

并网光伏逆变器

3.3

光伏系统的最大功率点跟踪技术

3.4

光伏系统PID效应及防护措施



3.4 光伏系统PID效应及防护措施

3.4.1 PID效应概述

PID (Potential Induced Degradation) 即**电位诱发衰减**，一般是指光伏电池长期处于非零的偏置电位并在相应的温湿度环境条件下诱发的性能衰减现象。

PID效应是由美国Sun power公司首次在2005年发现的，即在背接触**N型晶硅光伏电池**上施加正高偏压后会产生PID效应；2008年，Evergreen公司也报道了在正面连接的**P型光伏电池**中施加负高偏压后也会产生PID效应；2010年，Solon公司报道在标准的单晶和多晶硅光伏电池中都发现了极化效应；随即Solon公司和美国国家能源部可再生实验室（NREL）就提出在负高偏压下使用任何工艺生产的P型光伏电池都存在发生PID现象的风险。从PID的表现形式看，PID效应主要包括出现在晶硅电池中的“**极化效应**”和出现在薄膜电池中的“**TCO腐蚀效应**”

3.4 光伏系统PID效应及防护措施

3.4.1.1 晶硅电池中的“极化效应”

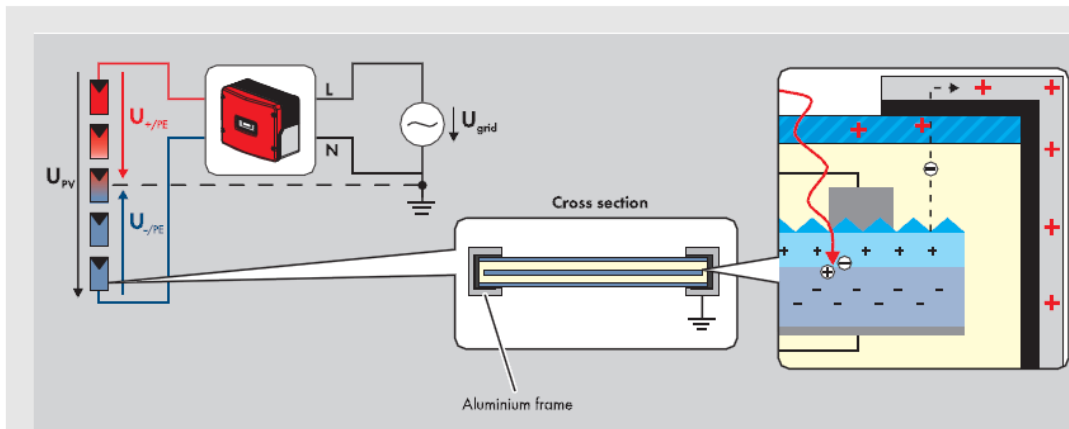


图3-72 光伏电池PID效应原理示意

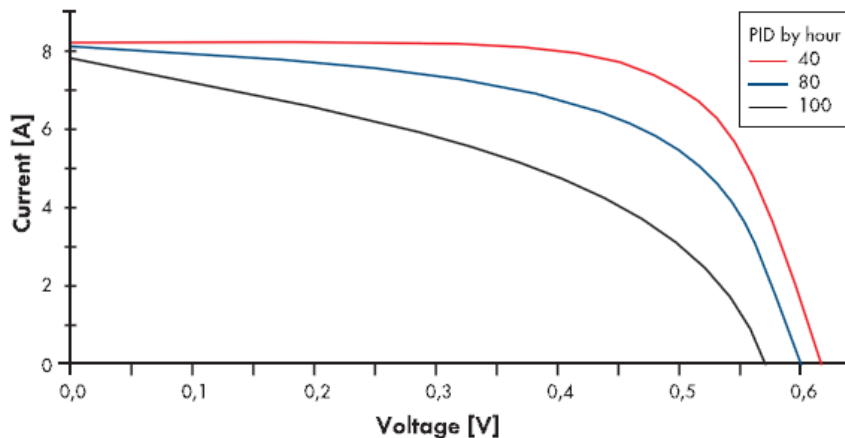


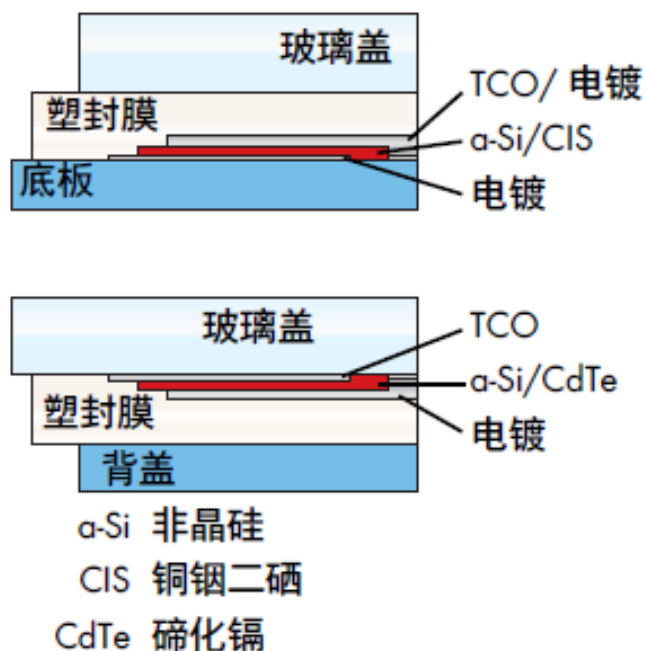
图3-73 不同PID效应时间对光伏电池特性的影响



3.4 光伏系统PID效应及防护措施

3.4.1.2 薄膜电池中的 “TCO腐蚀效应”

TCO薄膜，即透明导电氧化物（Transparent Conductive Oxide，简称TCO）薄膜是一种具有接近金属导电率、可见光高渗透率、红外区高反射率等特性的一种理想的薄膜电池材料。



如图3-74所示，而玻璃盖中含有15%的钠物质，当薄膜电池长期处于湿度较高的环境中时，空气中的水汽同样会通过组件边缘渗透进入TCO玻璃中，从而会导致钠和水的化学反应，以此形成了薄膜电池中的“TCO腐蚀效应”。“TCO腐蚀效应”是不可逆的。



3.4 光伏系统PID效应及防护措施

3.4.2、PID效应的防护

3.4.2.1 PID效应防护概述

1. 晶硅电池“极化效应”的防护措施

针对晶硅电池“极化效应”的防护措施主要有：

- ✓ N型前表面太阳电池的组件采取**正极接地**，P型前表面电池的组件采用**负极接地**；
- ✓ 增强组件的绝缘和防水性能，减小漏电流。例如可以采用稳定性能更好的封装材料、不使用金属边框、增加电池的体电阻、改进钝化膜的厚度和特性、在器件中增加阻挡层等；
- ✓ 采用石英玻璃、低钠玻璃等材料，以抑制带电离子的产生；
- ✓ **降低**光伏电池组**串电压**，甚至可采用组件级的光伏发电系统；
- ✓ 增加**防极化补偿装置**避免和修复电池组件的PID效应。



3.4 光伏系统PID效应及防护措施

3.4.2、PID效应的防护

3.4.2.1 PID效应防护概述

2. 薄膜电池“TCO腐蚀效应”的防护措施

针对薄膜电池“TCO腐蚀效应”的防护措施主要有：

- ✓ 薄膜电池阵列**负极接地**；
- ✓ 密封模块边缘，防止水分子渗入模块；
- ✓ 变压器N点电位补偿；
- ✓ 通过加大组件和接地边框的距离减小漏电流。

值得注意的是，由于薄膜电池“TCO腐蚀效应”的不可逆性，因此当采用电位补偿方案时，不能采用间断性的工作模式。



3.4 光伏系统PID效应及防护措施

3.4.2.2、PID防护方案1——光伏阵列**负极接地**

光伏电池阵列负极接地有如下**优点**：

- 泄放静电，防止对地共模电压超过系统电压；
- 抑制光伏阵列的对地分布电容对逆变器控制电路的共模干扰；
- 建立光伏阵列正电场，防止PID效应发生。

光伏阵列负极接地方案对光伏逆变器提出以下**要求**：

- 必须选用带工频或高频**隔离**的光伏逆变器。
- 接地时一般是将负极通过熔断器接地，以确保正极出现绝缘短路故障时熔断器断开，从而能实施绝缘故障的检测。
- 通常采用霍尔电流传感器来检测接地回路的电流。
- 逆变器直流侧要配备绝缘电阻监测和保护电路，当检测到漏电流超标时，或者检测到有人触电时，会在极短时间内自动断开直流侧开关，保护人员和设备安全。

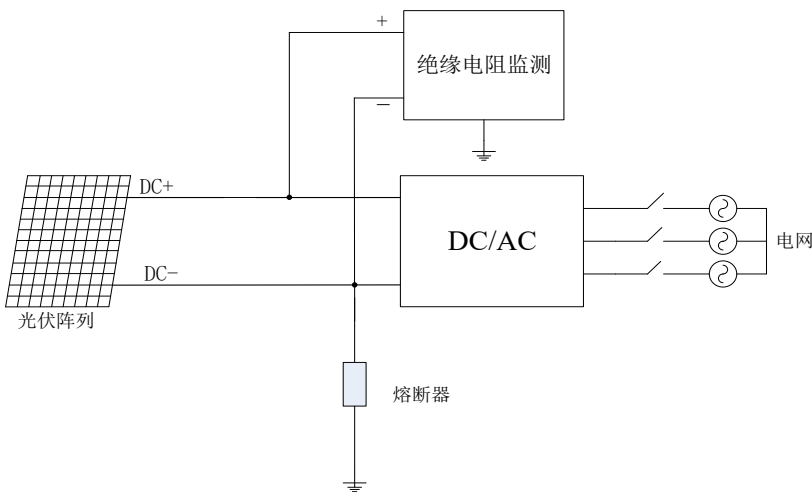


图3-75光伏阵列负极接地示意



3.4 光伏系统PID效应及防护措施

3.4.2.3 PID防护方案2——电位补偿

1. 基于正极电位抬升的PID修复方案

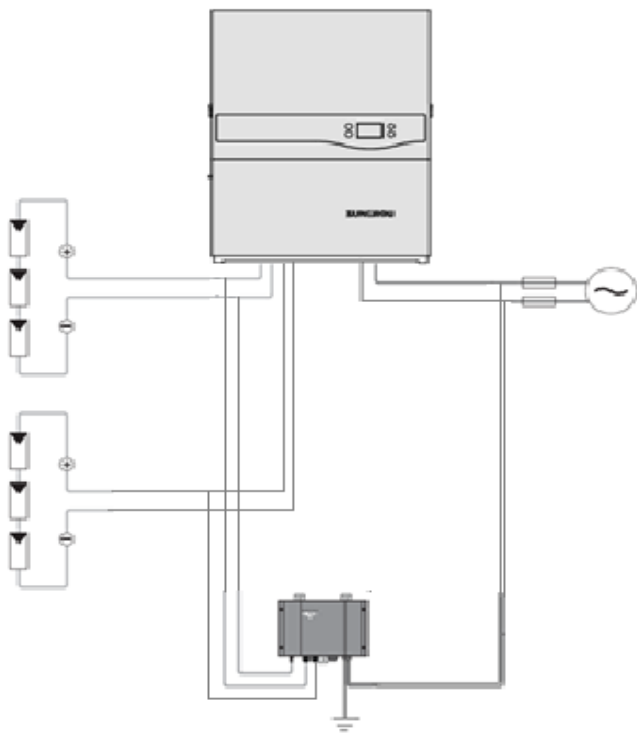


图3-76 基于光伏阵列正极抬升的PID修复方案原理

该方案的**优点**:

- 适用于**非隔离**型逆变器并网光伏系统;
- 节省了接地装置;
- 便于在原有的系统中进行加装。

该方案的主要**缺点**:

- 每台逆变器均需加装, 成本较高。
- 不适用于薄膜电池的PID防护。

3.4 光伏系统PID效应及防护措施

3.4.2.3 PID防护方案2——电位补偿

2. 基于变压器N点电位补偿的PID防护方案

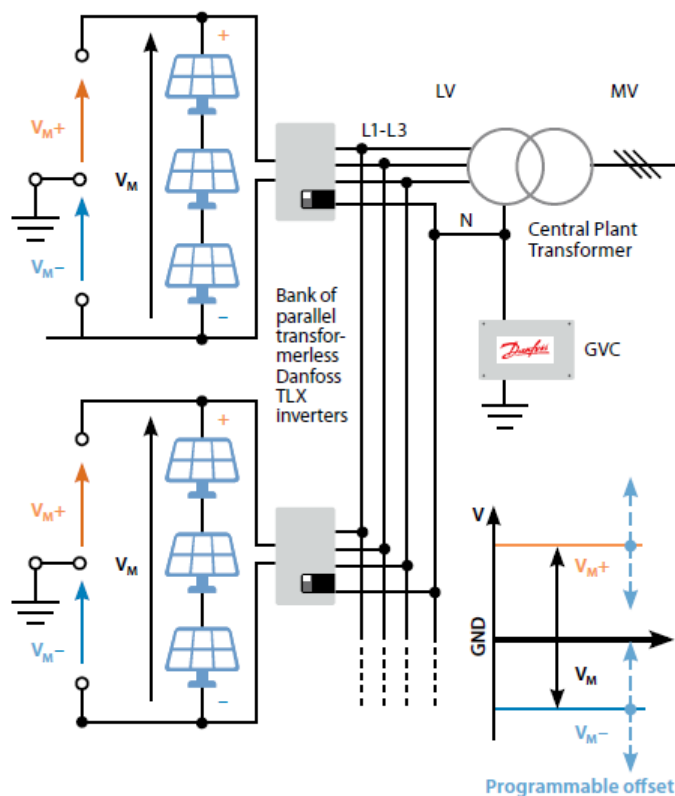


图3-77 并网变压器N点电位补偿的反PID方案原理结构

该方案的主要**优点**:

- ✓ 可按正或负两方向进行阵列电位补偿，既适用于晶硅电池PID（极化效应）防护，又适用于薄膜电池的PID（TCO）防护；
- ✓ 在并网光伏系统中，每台中压变压器接一台补偿装置，成本相对较低，安装方便。

该方案的主要**缺点**:

- ✓ 使用较少的补偿装置会使可靠性降低，一旦出现故障，将使与其相连的所有光伏阵列都面临PID效应风险。
- ✓ 与同一台补偿装置相连的光伏电池必须是同类型的光伏电池，这样会造成电池组件更换不灵活。